部分放電試験について

新方式絶縁評価方法の提案〈部分放電試験〉

従来方法の課題点

●絶縁試験の必要性

最近はPL法の施行以来、CEマーキング・Sマーク等が話題になり、安全についての関心が高まりつつあります。電気・電子機器における安全は、ほとんどが「電気的絶縁」(以下「絶縁」と略す。)によって保たれているといっても過言ではありません。

絶縁は、漏電や感電を防止するために重要であり、IEC規格・UL規格・電気用品取締法等の安全規格で、絶縁距離や試験方法が定められているので、これらを満足しなければなりません。

しかし安全規格で定められた試験方法にはいくつかの課題点があり、特に部品レベルでの絶縁評価には適さない点があります。ここではそれらについて説明し、その解決方法として新たな絶縁評価方法を提案いたします。

●従来の絶縁評価方法およびその限界

絶縁不良の原因としては次のことが考えられます。

(1)組み立て上の不良
- ・電極の曲がり・バリ
- ・絶縁物の欠損・ボイド

(2)絶縁材料の不良
- ・材料の不均一
- ・材料の変質

それらの不良を検出するために、従来から行われている絶縁評価方法として、絶縁抵抗試験および耐電圧試験があります。

絶縁抵抗試験は、被試験物に直流電圧を印加して、それによって被試験物に流れる電流値から、直流抵抗値をオームの法則で算出するもので、通常は$10^6\Omega$(1MΩ)以上を測定します。この試験は、被試験物の絶縁物が吸湿などの理由で、絶縁性能が低下していないかどうかを、判定するために行われます。印加する直流電圧は500Vや1000Vなど、耐電圧試験に比べて低い電圧であることが多く、またそのような試験であるため、絶縁材料の変質(吸湿等)は検査できますが、絶縁物の欠損やボイドまでは検査できないことが多くありました。

耐電圧試験は、一般的には被試験物に交流の高電圧を印加して、被試験物が破損しないことを確認する試験であり、まれに直流電圧で試験することもあります。

耐電圧試験では、不良品を絶縁破壊させるために、印可する高電圧は500VAの容量を持っています。耐電圧試験の良否判定は被試験物の破損の有無によって行われますが、耐電圧試験器は被試験物が絶縁破壊したときに流れる電流(この電流のことをリーク電流と呼びます)を検出し、被試験物の良否判定をおこないます。つまり耐電圧試験器は「絶縁破壊=電流の増加」として扱っているわけです。このように耐電圧試験は良否判定を行うだけの試験であり、試験で不合格になった被試験物は、多くの場合破損していて復元不可能な状態になっています。

普通、耐電圧試験器の電流検出方法は実効値検出または平均値検出であり、ピーク電流値の検出は行っていません。また絶縁物の静電容量成分に流れる無効電流(この電流もリーク電流に含まれる)を分離できないので、小さな放電電流は検出できません。したがって単発放電や部分放電は検出できず、絶縁不良の原因になるボイド等が存在していても、耐電圧試験で破壊(電流の増加)がなければ良品と判断されてしまいます。

絶縁評価方法の新提案部分放電試験

従来の耐電圧試験は、電子機器の完成時の安全確認試験用で、そのまま部品の試験に適用するには、以下に示す例のように、無理な部分がありました。

例1 破損の有無しか検出できないため、破損しかかった部品を製品に組込み、最終製品としての耐電圧試験で破損してしまう。

例2 不良の部品が瞬時にオープンモードで破損してしまったとき、電流の増加がないため耐電圧試験器が不良を検出できない。

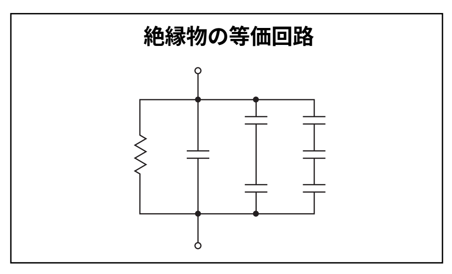
例3 印加するエネルギーが大きいため、不良品の受けるダメージが大きく、補修や解析が困難。

部分放電試験では、絶縁破壊に至る前の状態を検出するので、従来の耐電圧試験では分からなかった潜在的な不良や、製造上のバラツキも検出できます。また、以下のメリットが見込めます。

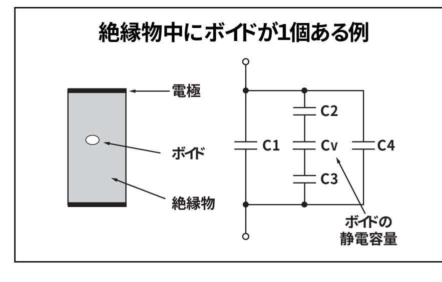
① 絶縁設計の最適化
② 製造バラツキの縮小
③ 材料のバラツキの発見
④ 安全性の向上
⑤ 原因不明の不良解析に一役
⑥ 非破壊で不良を検出できれば、欠陥部分の調査が可能

部分放電試験の原理

絶縁物をはさんだ電極は、コンデンサとみなせます。その絶縁物が何らかの理由(ボイド・欠損・材料不均一等)で、組成が一様でないときはさまざまな容量を持つコンデンサの集まりと見なせます。



絶縁物=誘電体
無機絶縁物:劣化しにくい(燃えにくい)
有機絶縁物:劣化しやすい(燃えやすい)



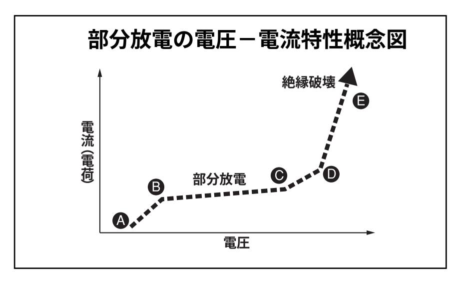
① 通常ボイドは空気等の気体でできていて、その大きさは非常に小さいので、ボイドの静電容量(単純には測定できない)も小さい。(CvはC2・C3に比べて小さい。)
② 電極間に電圧を印加すると、静電容量の小さいボイドの部分に大きな電圧がかかります。
③ 絶縁距離が小さなボイドは比較的低い電圧で放電する。
④ ボイドで放電が発生しても絶縁物があるので電極間を短絡する放電には至らない。

以上の例のように、絶縁物中のボイド等で放電が発生しても、電極間の放電には至らない状態のことを部分放電といい、その時の電荷の移動を検出するのが部分放電試験器です。

また絶縁物の表面で発生する部分放電のことを、特にコロナ放電といいます。

部分放電と絶縁破壊の関係

電極間に印加された電圧と放電の関係は以下のようになります。



被試験物に印可した電圧を徐々に上昇させると、まず部分放電が開始します(A)。その後火花が発生(D)してアーク放電(E)に移行し、絶縁破壊に至ります。

アーク放電に移行しても、さらに電力が供給されると、絶縁破壊した被試験物は、アーク放電の熱でさらに焼損するといった状態になります。

部分放電領域においてさらに詳しく見ると、Aの部分放電開始の後、BからCの安定領域に入りますが、この領域では絶縁物中の複数のボイド等で、部分放電が発生しています。その後CからDの部分放電急増領域を経た後に、各ボイド間の絶縁が破壊されてアーク放電に移行します。

また、火花が発生しない電圧であっても、部分放電発生時にはオゾンや窒素酸化物が発生するので、絶縁物は劣化を進めます。

ただし、端子間に空気以外の絶縁物を持たない構造で、端子間の距離が短いときには、部分放電(コロナ放電)が発生しない場合(AからDの間隔が非常に短い場合)があります。この場合は部分放電の段階で不良を発見することが困難であるため、アーク放電開始で不良を発見しなければなりません。

耐電圧試験と部分放電試験の違い

	従来の耐電圧試験	部分放電試験
検出電流	0.1mA〜100mA	10μA以下
供給電流	0.1A以上	10mA以下

供給エネルギーとしては10^6程度の差となります。

部分放電試験の規格

部分放電またはコロナ放電を利用して、部品等の試験をしようとする試みは、古くから行われており、いくつかの規格が定められています。

EN 50/78	産業用電子材器
JEC-0401	部分放電測定
VDE0884	フォトカプラ
VDE0110	低電圧装置における電装品のための絶縁協調
JIS C5311	電子機器用電源変圧器試験方法
JIS C1731	計器用変成器
JEC-208	特別高圧(11〜77kV)架橋ポリエチレンケーブルの高電圧試験方法

部分放電試験の注意事項

放電を利用した試験であるため、原理上測定結果にある程度のばらつきが生じます。そのバラツキを少なくするために、以下のことに注意して試験しなければなりません。

- ● 周囲環境　湿度・電磁波等の環境が一定(可能であれば気圧を一定にしたい)
- ● 治具での部分放電を防止する(治具へのほこり・汚れの付着は部分放電の原因になる)
- ● 決められた周期を守り校正する。

アプリケーション〈測定事例〉

潜在的な不良を発見する

電気絶縁の性能が悪いと、電気・電子機器が破損するばかりでなく、漏電や感電などの財産や人体に対しても、損害をもたらす場合があります。
部分放電試験は、絶縁物の絶縁状態を調べるために有効な試験方法です。従来から行われてきた耐電圧試験では、絶縁破壊の有無しか分かりませんでしたが、部分放電試験では絶縁破壊に至る前の状態がわかります。

電力系設備の絶縁不良による事故は、電子・電気機器の絶縁不良による事故と比べ物にならないほど、被害も大きく、社会的な影響も小さくありません。そのため部分放電試験は、昔から高圧電線やトランス・モータ等の電力系設備の評価や劣化診断で行われていました。その原理を電子部品の絶縁評価に応用しようとするのが、部分放電試験器KPD1050なのです。

KPD1050は、研究開発部門向けにデータ処理をしやすいように、パーソナルコンピュータに専用バスで接続された試験器で、Windows95上の専用コントロールソフトウエアで動きます。部分放電試験を行えば、耐電圧試験では発見されなかった潜在的な不良を発見することができますが、ここでは実際にKPD1050を使用して部分放電試験を行った例を挙げてその効果を示したいと思います。

フォトカプラの部分放電試験

フォトカプラは最近の電子機器では多く使用されている部品です。多くの場合で電子機器の1次回路と2次回路の間を、絶縁して信号を伝達するために使われます。フォトカプラの絶縁破壊は、電子機器の1次回路と2次回路の短絡となり、漏電や感電などにつながります。

フォトカプラの1次―2次間で部分放電試験を行った例を図1に示します。図1において、sample1およびsample2はどちらも耐電圧の仕様が1.5kVのものですが、sample2は新品のものであるのに対して、sample1は10時間以上の間、1.5kV以上の電圧を印可し、わざと劣化させたものです。そして図1のグラフから次のような考察ができます。

一般にフォトカプラの耐電圧の仕様は、絶縁破壊電圧に対して十分な余裕があるようで、新品のフォトカプラ(sample2)の部分放電電荷量は、耐電圧の仕様である1.5kVを超えたあたりから発生し、2kV近い電圧を印可しても部分放電電荷量は1pC以下と非常に少ないことがわかります。一方わざと劣化させたsample1は1.2kVくらいから部分放電が発生し、耐電圧の仕様である1.5kVでは、10pCから100pCの部分放電をしています。また2kV近くまで電圧を上げると、200pCほどの部分放電が発生していて、これは新品であるsample2の200倍にもなります。この劣化させたフォトカプラsample1は、耐電圧試験を行っても、異状は検出されませんでした。つまり耐電圧試験で検出できない劣化を、部分放電試験では検出できたわけです。

部分放電の単位

部分放電に限らず、放電現象はランダムに発生します。同じ被試験物に同じ電圧を印可しても、常に同じ量の部分放電が発生するとは限りません。図1をみると、ノイズ波形のようにグラフの線が上下しており、このようなデータになるのが部分放電現象の特徴なのです。また部分放電はパルス状に電流が流れる現象であるため、電流の実効値での表現が難しく、よって部分放電はその量を表現するとき、電流値としてでなく電流値を積分した電荷量で表現するのが一般的です。電荷量[単位C(クーロン)]は電流を時間で積分したものですから、電流値とその継続時間の両方を同時に表すことができます。小型電子部品の部分放電電荷量は1pCから100μCの範囲で発生するものが多いようです。

部分放電試験器KPD1050では、交流電圧波形の1サイクルごとに、部分放電で発生した電流を積分し、電荷量を求めています。その処理を休みなく行うことで、ランダムに発生する部分放電を漏れなく計測できるのです。

部分放電試験のデータ処理方法

部分放電はランダムに発生しますが、それに加えて、被試験物に高電圧を印可して試験するわけですから、多かれ少なかれ被試験物の劣化があります。したがって部分放電試験においては、複数回の計測でまったく同じデータを得ることは、不可能と言えます。しかしデータの傾向は複数回の計測であっても、ほとんどの場合で同じものが得られるので、数値データとしてよりもデータの傾向を読み取ることが必要です。

データの傾向を見る手段として移動平均法があります。図1のグラフのデータに移動平均処理をした例を図2に示します。この図1に比べて図2のグラフの方が、全体の傾向をつかみやすく、このグラフを見ながらであれば、前記の測定結果の考察はわかりやすいと思います。なお、これはデータ処理の一例であり、他にもいろいろな処理方法が考えられます。KPD1050では、計測したデータをすべてMicrosoft Excel97に転送し、その処理を全てExcel97上で行います。このような仕組みになっているため、絶縁物を評価する研究者または開発者は、その被試験物にあった方法でデータ処理を行うことができるのです。

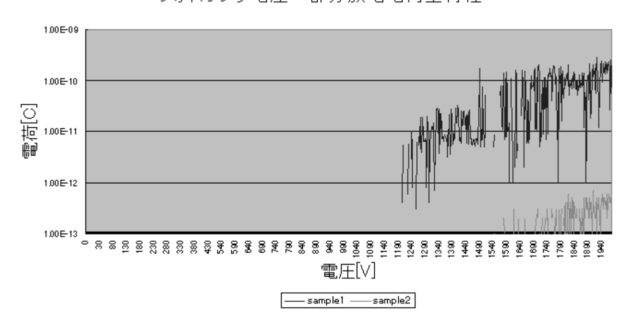
リレーの部分放電試験

リレーはフォトカプラと同様に、電子・電気機器で多く使われていますが、フォトカプラが使われる以前から、様々なところで使用されているため、非常に多くの用途・種類があります。リレーはフォトカプラに比べて、大きな電力をスイッチできることから、電力制御に使用される場合があり、家庭用のマイコン制御の電気機器では、電力制御用にリレーが使用されています。

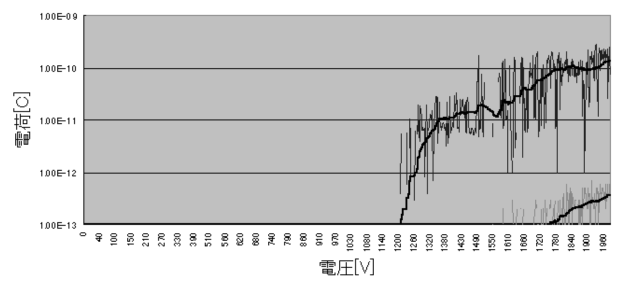
商用電源の100Vをスイッチするために使用するリレーで、万一絶縁不良を起こすと漏電の原因になり、重大な事故につながります。そのため絶縁性能は通常の信号系のリレーに比べて高いものが要求されます。具体的には通常の信号系リレーの耐電圧仕様が1kVや1.5kVであるのに対し、電力用のリレーは2.5kVや3kV等のものがあります。

図3は接点―コイル間の耐電圧仕様が、3kVの電力用リレーの部分放電特性を調べたものです。これを見ると、仕様である3kVの半分の1.5kVくらいから部分放電が発生していることがわかります。この例では3kVまで電圧を印加していませんが、これだけ部分放電が発生していて

[図1] フォトカプラの部分放電試験の例



[図2] 移動平均処理したフォトカプラの部分放電試験結果



部分放電試験について

も、外から見た限りでは特に異常は見当たらず、もちろんリレーは破損していないのです。

部分放電電荷量としては、最大で1.6E-09［C］、つまり1.6nC程度です。

図4は接点ーコイル間の耐電圧仕様が、2.5kVの電力用リレーの部分放電特性を調べたものです。これも偶然ですが、2.5kVの半分の1.2kVくらいから部分放電が発生しています。また比較的安定に部分放電が発生しているので、この場合は特に移動平均等の処理をしなくても、傾向が良く分かります。このサンプルでは、部分放電電荷量は最大で1.8E-08［C］つまり18nC程度と、サンプル1の10倍の電荷量です。しかしこの場合もリレーには、特に異常は見受けられませんでした。

以上2つの例のように、耐電圧の仕様の電圧以内であっても、部分放電は発生しているのです。部分放電は部分放電試験器を使用したときだけ、発生するものでなく、普通に耐電圧試験を行っているときも、同様の部分放電現象は発生しているのです。しかし、耐電圧試験器では部分放電が検出できないので、これまでは部分放電が発生していることに、気がつかなかったのです。

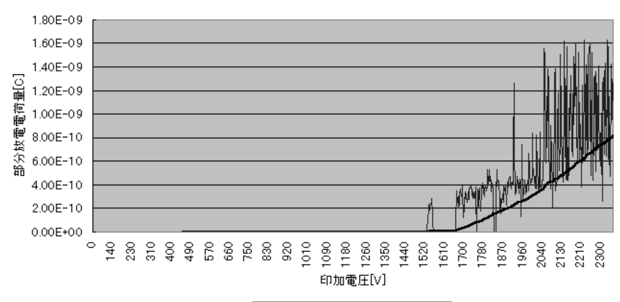
部分放電の発生がすぐに、絶縁破壊につながるものではありません。しかし部分放電によって、オゾンや窒素酸化物が生成され、それが絶縁物や電極を腐食し、長い間には絶縁破壊やコイルの断線・接点での接触不良等に至ることも考えられます。つまり、部分放電の発生自体は悪い
ものではありませんが、部分放電の発生を少なくすることで、部品の寿命や信頼性を向上させることができるのです。

図5のデータは、信号系リレーの接点ーコイル間（耐電圧仕様1kV）に、破損するまで電圧を印加しデータです。これまでのグラフと異なり、部分放電電荷量の範囲が広いため、縦軸はlogスケールにしています。

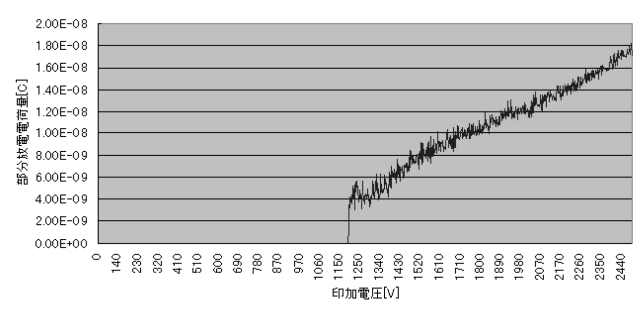
部分放電は0.5kVを超えたあたりから発生し始め、1.6kVくらいまでは徐々に部分放電電荷量が増えています。しかし、1.6kVくらいを過ぎたあたりから1.7kVくらいまでの間に急に増加し、それ以降さらに部分放電電荷量は増加しています。そして1.72kVくらいでリレーは絶縁破壊してしまいました。

絶縁耐圧仕様の1kV付近では1pC以下の部分放電電荷量ですが、破損に至るときには、1nCから1μC近くまで、1000倍以上に増加しています。この例のように、ある電圧を過ぎると急激に部分放電電荷量が増える現象は、多くの試料で観測できます。このことを利用して、電荷量が急激に上昇する初期段階までを測定すれば、被試験物を破損させないで試験することができます。先の例では部分放電発生量が10pCを超えるまで電圧を上昇させ、その電圧のばらつきで絶縁性能のばらつきを調べる方法が考えられます。

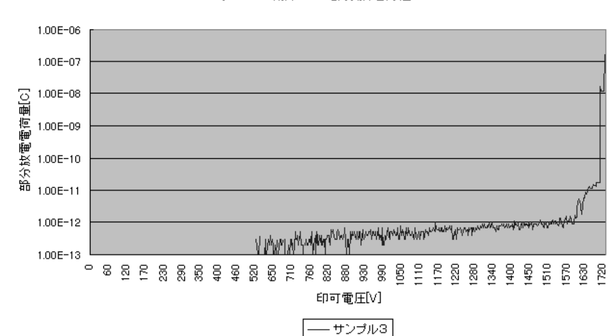
［図 3］



［図 4］



［図 5］



部分放電試験 Q&A

質問1：部分放電試験器と耐圧試験器の違いがよくわかりません。

耐圧試験器は、安全規格で定められた電圧を被試験物に印加し、被試験物 が絶縁破壊するかどうかを試験します。それに対して部分放電試験器は、被試験 物が絶縁破壊に至る前に発生する、部分放電現象を利用しますので、被試験物が 絶縁破壊するまでの状態を知ることができます。

質問2：部分放電試験器は、どのようなところで使われるのですか?

耐圧試験器は電気・電子機器の試験用に作られていますが、部分放電試験器は部品の試験用に開発されたものであり、絶縁が要求される部品の試験に使用されます。以下に被試験物の例をあげます。

- フォトカプラ
- リレー
- スイッチ
- 絶縁型半導体
- 小型モータ
- トランス
- 積層セラミックコンデンサ
- 絶縁型ヒータ
- 絶縁シート
- 絶縁材料
- ガス管継手部品（金属パイプの絶縁ジョイント部）
- プリント基板
- セラミック基板
- 金属ベース基板

質問3：使い方は簡単ですか?

基本的な使用方法を以下に示します。（なお、実際の操作にあたっては、必ず取扱説明書を熟読いただきますようお願いいたします。）

1. 試験端子に被試験物を接続します。
2. 試験電圧に関する設定（電圧値・印加方法・印加時間等）をします。
3. 試験をスタートします。
4. 画面上に放電電荷量などの測定結果がグラフで表示されます。
5. 測定終了後Microsoft Excel97にデータを転送し、Excel上でさまざまなデータの解析をおこないます。
6. 試験前に放電電荷量の限度値を設定しておくと、限度値を超える部分放電 が発生したとき、試験を中止することができます。

質問4：校正はどのようにしておこなうのですか? また年何回おこなえばよいのですか?

放電電荷量の校正は、外部から既知の電荷を試験端子に注入しておこないます。電荷量（Q）・静電容量（C）・電圧（V）は Q=CV の関係がありますので、正確に静電容量のわかっているコンデンサと正確な電圧を組み合わせて注入電荷を生成します。

そして、校正の周期ですが、始業点検時に放電電荷量の校正をおこないます。また通常の測定器と同じ周期で、電荷発生器の校正をおこないます。

なお、KPD1050部分放電試験器は電荷発生器（標準電荷出力端子）を装備しており、上記のような電荷量校正（始業点検）をおこなうことができます。